

PENGEMBANGAN LUMPUR SIDOARJO SEBAGAI AGREGAT RINGAN UNTUK BETON NON STRUKTURAL (THE DEVELOPMENT OF SIDOARJO MUD AS LIGHT WEIGHT AGGREGATE FOR NON STRUCTURAL CONCRETE)

Lasino¹⁾, N. Retno Setiati²⁾

¹⁾Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, ²⁾Pusat Litbang Jalan dan Jembatan

¹⁾Jl. Panyawungan, Cileunyi Wetan, Bandung 40622, ²⁾Jl. A.H. Nasution No. 264, Bandung 40294

e-mail: ¹⁾lsn_pu@yahoo.com, ²⁾retno.setiati@pusjatan.pu.go.id

Diterima: 23 Agustus 2017; direvisi: 28 Oktober 2017; disetujui: 21 Desember 2017

ABSTRAK

Lumpur Sidoarjo merupakan bahan mineral yang keluar dari dalam bumi akibat kegagalan teknis dalam eksplorasi migas di Porong Sidoarjo. Material tersebut dalam istilah geologi dapat dikategorikan sebagai produk erupsi mud volcano yang bisa terjadi di suatu kegiatan pengeboran. Bahan ini berbentuk cairan berbutir halus, berwarna abu-abu kehitaman, dan sangat plastis. Hasil pemeriksaan terdahulu menunjukkan bahwa unsur kimia yang terkandung didominasi oleh silika (>50 %), alumina (>25 %), besi (>8 %) dan beberapa unsur lain seperti kalsium dan magnesium dengan jumlah relatif kecil. Dalam upaya peningkatan nilai guna dan pemanfaatannya, telah dikembangkan agregat ringan yang memenuhi syarat untuk beton non-struktural. Proses pembentukan agregat ringan dilakukan melalui pembakaran setelah bahan baku dikeringkan, di-crusher dan diayak sampai menjadi ukuran nominal 10 mm, selanjutnya proses pembakaran menggunakan tungku putar pada suhu sintering (900 – 1000) °C. Hasil pengujian di laboratorium menunjukkan bahwa agregat ringan dari lumpur Sidoarjo cukup baik, keras, ringan, dan kuat dengan nilai kekerasan 10 % crushing value 94,18 kN, dan densitas antara (6,1–7,0) kg/L, sedangkan mutu beton ringan yang dihasilkan baru mencapai f_c 15 MPa dengan densitas (1,3–1,4) kg/L. Untuk syarat pelaksanaan, penggunaan margin keamanan 7 MPa dengan kemungkinan cacat 5% masih perlu ditelusuri lebih lanjut.

Kata kunci: Lumpur Sidoarjo, mineral alam, proses pembakaran, agregat ringan, beton ringan

ABSTRACT

The mud of Sidoarjo is a mineral that comes out of the earth due to technical failure in the exploration of oil and gas in Porong Sidoarjo. The material in geological terms can be categorized as a mud volcano eruption product that could occur in particular drilling activities. This material is finely granular, gray-black and very plastic. Previous investigation results showed that the chemical elements are dominated by silica (> 50 %), alumina (26 %), iron (8 %) and some other elements such as calcium and magnesium with a relatively small amount. In an effort to increase the use and practical application, a lightweight aggregate concrete is developed to meet the requirement of non-structural concrete. The lightweight aggregate formation process is done through burning the dried raw material, crushing, and sieved to be a nominal size of 10 mm, and subsequent combustion process in a rotary furnace at sintering temperatures of (900–1000) °C. The test results showed that lightweight aggregate of mud of Sidoarjo is good enough, hard, light, and strong in ten percent crushing value (hardness value) of 94.18 kN, and a density between (6.1-7.0) kg /L, while the lightweight concrete quality in laboratory can reach f_c 15 MPa with a density of (1.3- 1.4) kg /L. However, in practice, the construction requirement of 7 MPa as safety margin and 5% diffectiveness are need to be studied further.

Keywords: Sidoarjo mud, natural mineral, combustion process, lightweight aggregates, lightweight concrete

PENDAHULUAN

Saat ini semburan lumpur masih berlangsung dengan kapasitas sebesar 30.000 m³ sampai dengan 80.000 m³ perhari dengan suhu di pusat semburan > 100°C, hal ini disebabkan masih tingginya tekanan dari dalam bumi sehingga masih memerlukan penanganan dan pengendalian yang lebih baik.

Peristiwa semburan dan luapan lumpur panas di Porong Sidoarjo sejak tahun 2006 sampai sekarang belum bisa teratasi. Luapan lumpur panas yang diakibatkan kegagalan teknis saat pengeboran minyak bumi dan gas oleh PT. Lapindo Brantas telah ditetapkan Pemerintah sebagai bencana nasional. Banyak kerugian materi yang sampai saat ini masih belum terselesaikan oleh pihak yang bertanggung jawab atas musibah tersebut. Untuk mengatasi masalah tersebut, dilakukan berbagai upaya agar lumpur yang sangat berlimpah tersebut bisa dimanfaatkan sebagai bahan tambah beton atau sebagai bahan pengganti semen. Kandungan silika pada lumpur Sidoarjo lebih tinggi dari semen Portland yaitu sebesar 53,08 % (Tjokrodinuljo 1996).

Dilain pihak, kemajuan teknologi di Indonesia mengarahkan pembangunan infrastruktur pada penggunaan struktur dengan material ringan tanpa mengurangi kekuatannya. Penggunaan material ringan sebagai bahan pembentuk struktur akan mengurangi berat total dari suatu bangunan. Hal tersebut dapat mengurangi penggunaan material bagian pendukung dan fondasi sehingga biaya keseluruhan konstruksi bangunan akan berkurang. Beton ringan merupakan salah satu material ringan pembentuk struktur (Dharmagiri, Sudarsana dan Tutarani 2008). Beton ringan lebih banyak menggunakan agregat ringan dibanding agregat alam karena memiliki banyak keuntungan, seperti sifatnya yang lebih ringan dan konduksi panas lebih rendah (Bardhan, Helgesen, and Ikeda 1995). Beton non struktural adalah beton yang tidak menerima beban yang berat dari suatu struktur bangunan. Dalam infrastruktur jalan dan jembatan beton ringan dapat digunakan untuk bangunan non struktural.

Berdasarkan penelitian dan karakteristiknya, lumpur Sidoarjo berpotensi

dijadikan sebagai agregat ringan. Hal ini diharapkan dapat menjadi salah satu alternatif pembuatan beton ringan, yang mengurangi eksploitasi batu alam (*split*) yang merupakan *non-renewable resource* serta membantu mengatasi permasalahan limbah lumpur Sidoarjo.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan metode pembuatan agregat ringan menggunakan bahan dari material lumpur Sidoarjo, berdasarkan karakteristik material lumpur dan optimalisasi suhu bakar. Kemudian menguji mutu agregat yang dihasilkan dan mutu beton ringan yang dapat dicapai. Dengan demikian pengembangannya dapat menghasilkan produk yang baik, sehingga hasil penelitian ini dapat dikembangkan melalui kebijakan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR).

KAJIAN PUSTAKA

Lumpur Sidoarjo dengan sifat fisik yang sangat halus, berwarna abu-abu kehitaman, sangat plastis, memiliki unsur kimia silika (> 50 %), alumina (26 %), dan beberapa unsur lain seperti besi, kalsium dan magnesium dengan jumlah yang relatif kecil. Dengan unsur silika dan alumina yang terkandung tersebut lumpur Sidoarjo dikembangkan menjadi agregat ringan melalui proses pembakaran sehingga diperoleh suatu butiran yang ringan, kuat dan stabil, serta dapat digunakan untuk agregat dalam pembuatan beton ringan non-struktural (BSN 2014). Indikasi tersebut juga dapat diperkirakan berdasarkan proses terjadinya pembekuan yang pada prinsipnya memerlukan bahan baku yang mempunyai komposisi kimia yang seimbang antara *flux* (CaO, MgO, FeO, Fe₂O, K, Na₂O), silika (SiO₂), dan alumina (Al₂O₃) untuk menghasilkan leburan yang viskous cukup untuk menahan gas yang timbul pada temperatur tinggi, serta mengandung zat-zat yang dapat terurai atau bereaksi dengan konstituen lain untuk menghasilkan gas pada temperatur dimana terjadi leburan (Sugiarto dan Lasino 2014). Dari uraian di atas maka persyaratan bahan baku perlu dipenuhi berdasarkan unsur kimianya sebagai berikut (Liu 2009):

SiO ₂	: 50 – 70 %
Al ₂ O ₃	: 10 – 35 %
Fe ₂ O ₃	: 2 – 8 %
TiO ₂	: 0,1 – 2 %
CaO	: 0,5 – 15 %
MgO	: 0,2 – 5 %
SO ₃	: 0 - 0,5 %
Hg	: 3 - 12 %

Proses pembentukan agregat dilakukan melalui pengeringan dan pemecahan dari bahan baku lumpur Sidoarjo dengan alat *crusher* kemudian disaring untuk mendapatkan butiran dengan ukuran tertentu, selanjutnya dibakar pada suhu sintering antara (900-1000) °C dengan menggunakan tungku putar (*rotary kiln*). Dengan tungku putar keuntungan yang diperoleh antara lain:

- 1) Prosesnya berlangsung cepat;
- 2) Agregat yang dihasilkan ringan atau permukaan agregat halus dan keras karena terlapis dengan lapisan serupa *glass* akibat pembakaran yang sempurna;
- 3) Kapasitasnya besar dengan proses kontinu;
- 4) Waktu pembakaran dapat diatur dengan tiga variabel, yaitu banyaknya bahan bakar, kecepatan putar, dan kemiringan dapur putar.
- 5) Penggunaan bahan bakar dapat diminimalisasi.

Proses pembakaran dapat dilakukan dengan sistem kering yaitu bahan baku yang berupa gumpalan padat, setelah kering dipecah, dan diayak kemudian langsung dimasukkan ke dalam tungku bakar. Proses ini biasanya

menghasilkan agregat dengan bentuk dan sifat permukaan yang kurang beraturan. Berlaku untuk bahan lempung yang sangat keras, yaitu *shale* atau *slate*. Sedangkan dengan sistem basah, yaitu bahan baku dalam keadaan basah, diaduk, dan bila perlu ditambah dengan bahan lain (batubara, kokas, atau antrasit) kemudian dibentuk menjadi butiran bulat (*pellet*) ukuran tertentu kemudian dikeringkan dan dibakar. Proses ini akan menghasilkan agregat yang uniform, permukaan halus, bulat, dan lebih ringan (Puskim 2014 a, 2014 b). Tetapi dengan proses basah ini akan memerlukan biaya yang lebih tinggi dibanding dengan proses kering, dan cocok untuk bahan lempung basah atau plastis. Beberapa persyaratan yang harus dipenuhi dari agregat ringan struktural ini adalah berat jenis maksimum 1,8; penyerapan air maksimum 20 %; bobot isi gembur maksimum 0,9 kg/L; dan kekerasan dengan nilai keremukan 10% adalah (88 – 137) kN, sedangkan mutu beton yang dapat dicapai minimal adalah f_c' 15 MPa (benda uji silinder) atau K 200 (benda uji kubus) sesuai SNI 2461:2014 (BSN 2014a) untuk beton non-struktural. Berdasarkan SNI 2461:2014 (BSN 2014a) dan SNI 2847:2013 (BSN 2013) persyaratan agregat ringan untuk beton ringan struktural meliputi:

- 1) Gradasi (susunan besar butir);
- 2) Persyaratan sifat fisik; dan
- 3) Persyaratan kuat tekan dan kuat tarik belah beton yang dihasilkan, yang diuraikan dalam Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3 berikut.

Tabel 1. Persyaratan susunan besar butir agregat ringan untuk beton ringan struktural

Ukuran ayakan (mm)	Persentasi yang lolos ayakan (% berat)								
	25	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,60	0,30
Agregat halus: 4,75 – 0	-	-	-	100	85-100	-	40-80	10-35	5-25
Agregat kasar: 25,0-4,75	95-100	-	25-60	-	0-10	-	-	-	-
19,0 – 4,75	100	90-100	-	10-50	0-15	-	-	-	-
12,5 – 4,75	-	100	90-100	40-80	0-20	0-10	-	-	-
9,5 – 2,36	-	-	100	80-100	5-40	0-20	0-10	-	-
Kombinasi agregat halus dan kasar									
12,5 – 0	-	100	95-100	-	50-80	-	-	5-20	2-15
9,5 – 0	-	-	100	90-100	65-90	35-65	-	10-25	5-15

Sumber: BSN 2014

Tabel 2. Persyaratan sifat fisik agregat ringan untuk beton ringan struktural

No	Sifat fisik	Persyaratan
1	Berat jenis	1 – 1,8
2	Penyerapan air maksimum, setelah direndam 24 jam (%)	20
3	Berat isi maksimum, gembur kering (kg/m ³)	
	- Agregat halus	1120
	- Agregat kasar	880
	- Campuran agregat halus dan kasar	1040
4	Nilai persentasi volume padat (%)	60
5	Nilai 10 % bagian yang hancur (kN)	88 – 137
6	Kadar bagian yang terapung setelah direndam dalam air 10 menit maksimum (%)	5
7	Kadar bagian yang mentah (<i>clay lump</i>) (%)	< 1
8	Nilai keawetan, jika dalam larutan magnesium sulfat selama 16 - 18 jam, bagian yang larut maksimum (%)	12

Tabel 3. Persyaratan kuat tekan dan kuat tarik belah untuk beton ringan non-struktural

Berat isi kering udara 28 hari, maksimum (ton/m ³)	Kuat tarik belah rata-rata (MPa)	Kuat tekan rata-rata, 28 hari (MPa)
	Semua agregat ringan	
1,76	2,2	28
1,68	2,1	21
1,60	2,0	17
	Agregat ringan dan pasir	
1,84	2,3	28
1,76	2,1	21
1,68	2,0	17

Berdasarkan (Indonesia 2010) beton non struktural dengan kuat tekan ($10 \leq f_c' < 15$) MPa digunakan sebagai lantai kerja dan material timbunan beton. Sedangkan beton non struktural dengan kuat tekan ($15 \leq f_c' < 20$) MPa digunakan untuk struktur beton tanpa tulangan seperti beton siklop, trotoar, dan pasangan batu kosong yang diisi adukan. Beberapa penelitian yang sudah dilakukan terkait pemanfaatan lumpur Sidoarjo sebagai material pembentuk beton ringan diantaranya:

Ekaputri (2012) menggunakan lumpur bakar Sidoarjo sebagai bahan campuran pembuatan beton ringan dengan menggunakan tambahan buih dan serat alam. Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh bahwa penambahan lumpur bakar Sidoarjo dan *foam* (buih) ke dalam adukan membuat beton menjadi mengembang dan membentuk struktur berpori sehingga beton menjadi lebih ringan dengan berkurangnya berat jenis pada beton. Oesman (2007) membuat beton dengan

komposisi 35 % lumpur Sidoarjo dan 65 % pasir. Berdasarkan hasil uji diperoleh bahwa kuat tekan yang dicapai 17,84 MPa. Suprianto (2012) melakukan penelitian pemanfaatan lumpur Sidoarjo sebagai pengganti semen dengan variasi 0 %; 2,5 %; 5 %; 7,5 %; 10 %; dan 12,5 % terhadap berat semen. Hasil uji menunjukkan bahwa pemakaian lumpur Sidoarjo dengan persentase (5-10) % menghasilkan nilai kuat tekan maksimum. Susanto (2012) menggunakan lumpur Sidoarjo sebagai agregat kasar. Hasil uji menunjukkan bahwa nilai kuat tekan beton lebih rendah dari beton konvensional sehingga pemanfaatan lumpur Sidoarjo sebagai agregat kasar hanya dapat digunakan untuk beton non struktural. Untuk produksi agregat lumpur Sidoarjo yang dibakar, harga jual sebesar Rp. 515.000,- untuk setiap 1 m³. Sedangkan untuk harga produksi sebesar Rp. 392.000,- untuk setiap 1 m³.

HIPOTESIS

Beton ringan (*non structural*) dengan komposisi agregat ringan yang kecil dapat mencapai kuat tekan karakteristik 15 MPa pada tingkat ketelitian di laboratorium.

METODOLOGI

Bahan dan alat penelitian

Tanah

Tanah sebagai bahan baku berupa lumpur yang diambil dari semburan lumpur Sidoarjo pada kolam penimbunan/pengendapan di dua lokasi, yaitu kolam 1 dan kolam 2.

Alat pembakaran

Alat yang digunakan untuk uji coba pembakaran dalam menentukan suhu optimum adalah tungku pijar (*muffle furnace*), sedangkan alat untuk pembakar agregat menggunakan tungku putar (*rotary kiln*) yang ada di kantor Loka Teknologi Permukiman Cilacap.

Alat uji agregat

Pengujian agregat (kekerasan, densitas, gradasi, dan lainnya) menggunakan alat uji di laboratorium di kantor Loka Teknologi Permukiman Cilacap.

Alat uji beton

Alat yang digunakan untuk uji coba pembuatan beton adalah peralatan laboratorium bahan dan struktur bangunan Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman Bandung.

Metoda penelitian

Metode penelitian yang dilakukan adalah eksperimental laboratorium dengan membuat agregat beton ringan. Suhu bakar untuk mendapatkan suhu optimum dalam pembuatan agregat ringan divariasikan antara 800 °C sampai dengan 1100 °C seperti yang terlihat pada Tabel 4. Dengan demikian ada tiga hal yang ingin dicapai dari penelitian ini, yaitu karakteristik dari lumpur Sidoarjo, optimalisasi suhu bakar, dan mutu agregat ringan yang dihasilkan yang didukung oleh hasil pengujian agregat beton ringan.

Tabel 4. Rancangan uji coba suhu bakar agregat ringan

No	Tahap-1		Tahap-2	
	Suhu bakar	Waktu	Suhu bakar	Waktu
1	800 °C	5 menit	800 °C	10 menit
2	900 °C	5 menit	900 °C	10 menit
3	1000 °C	5 menit	1000 °C	10 menit
4	1100 °C	5 menit	1100 °C	10 menit

Uji coba pembakaran agregat dengan berbagai variasi suhu dan waktu bakar sebagaimana diuraikan dalam Tabel 4 dimaksudkan untuk mendapatkan hasil bakar yang optimal, agregat yang cukup matang, ringan, dan memenuhi syarat untuk beton ringan struktural. Pengamatan tingkat kesempurnaan pembakaran berdasarkan suhu dan waktu bakar diperiksa berdasarkan kondisi fisik dan kekerasan agregat dengan melakukan pengujian yang mencakup tingkat kerataan warna dan bentuk butiran (meleleh, gosong dan menggumpal). Setelah diperoleh suhu dan

waktu bakar yang optimal, selanjutnya dilakukan pembakaran skala penuh dengan menggunakan tungku putar (*rotary kiln*) dengan menyesuaikan kecepatan putar dan kelandaian posisi tungku sehingga diperoleh suhu dan waktu bakar yang sesuai (Puskim 2014). Hasil pembakaran dengan tungku putar berupa butiran agregat ringan dengan berbagai ukuran yang termasuk dalam kategori agregat kasar (kerikil), agregat halus (pasir), filler, dan debu. Setelah itu dilakukan pengujian yang meliputi kadar air, penyerapan air, berat jenis, bobot isi, dan kekerasan.

HASIL DAN ANALISIS

Hasil pengujian sifat fisik lumpur Sidoarjo

Hasil pengujian sifat fisik dan kimia lumpur Sidoarjo dapat dilihat dalam Tabel 5. Dari Tabel 5 diperoleh presentasi dari Indeks Plastis (IP) sebesar 37,40 % melebihi persyaratan yang diizinkan (30 %). Hal ini

menunjukkan bahwa lumpur Sidoarjo bersifat sangat plastis. Nilai kuat lentur kering sebesar 1,12 MPa menunjukkan sifat mekanik dari benda uji yang dibuat dari lumpur tersebut cukup baik.

Tabel 5. Hasil pengujian sifat fisik lumpur Sidoarjo

No	Uraian uji	Hasil uji	Persyaratan	Keterangan
1	Indek plastis (IP) (%)	37,40	< 30,00	sangat plastis
2	Klasifikasi	CH	-	lanau plastisitas tinggi
3	Berat isi basah (g/cm ³)	1,79	-	-
	Berat isi kering (g/cm ³)	1,12	-	-
4	Besar butir,		-	-
	> 2 mm, %	0,00	-	-
	> 0,02 mm, %	22,00	-	-
	0,02-0,002 mm, %	36,00	-	-
	< 0,002 mm, %	52,00	-	-
5	Nilai DSe,	1,09	-	peka terhadap pengeringan
6	Susut kering, %	7,10	-	peka terhadap pengeringan
7	Susut bakar, %	0,72	-	-
8	Kuat lentur kering, MPa	1,12	> 1,0	cukup baik

Keterangan : Hasil pengujian di Balai Besar Keramik Bandung, 2016.

Hasil analisis kimia

Hasil analisis kimia dari lumpur Sidoarjo disajikan pada Tabel 6. Berdasarkan Tabel 6, senyawa SiO₂ adalah yang paling dominan dalam lumpur Sidoarjo. Jumlah presentasi rata-rata senyawa tersebut dari

keempat contoh adalah 51,92 %. Senyawa terkecil yang terdapat dalam lumpur Sidoarjo adalah SO₃ dengan jumlah rata-rata sebanyak 0,96 %. Jumlah presentasi SO₃ berada dalam batas spesifikasi yang dipersyaratkan yaitu antara 0 % sampai dengan 0,5 %.

Tabel 6. Hasil pengujian analisis kimia lumpur Sidoarjo

No	Uraian uji/unsur	Hasil uji (%)					Syarat untuk bahan keramik
		Contoh 1	Contoh 2	Contoh 3	Contoh 4	Rata-rata	
1	SiO ₂	52,79	48,60	52,28	54,00	51,92	50 – 70
2	Al ₂ O ₃	26,35	28,94	23,24	21,74	25,07	10 – 35
3	Fe ₂ O ₃	8,51	8,37	8,26	8,34	8,37	2 – 8
4	CaO	1,97	3,92	4,76	6,08	4,18	0.5 – 15
5	MgO	2,53	2,21	2,42	3,49	2,66	0.2 – 5
6	K ₂ O	2,86	2,96	2,90	1,08	2,45	-
7	Na ₂ O ₃	2,08	1,71	2,17	2,11	2,02	-
8	SO ₃	0,98	0,97	0,92	0,96	0,96	0 – 0,5
9	Hg	1,92	1,06	1,76	1,67	1,60	3 - 12

Keterangan: Hasil pengujian di laboratoium Balai Besar Keramik Bandung (2016).

Hasil uji coba pembakaran agregat ringan

Uji coba pembakaran agregat ringan dari lumpur Sidoarjo dimaksudkan untuk memperoleh suhu maksimum dan waktu optimum dalam proses pembakaran, sehingga diperoleh hasil agregat yang baik dengan sifat

fisik yang memenuhi syarat untuk agregat beton ringan non-struktural (Puskim 2009). Proses uji coba pembakaran dengan berbagai suhu dan hasil yang diperoleh disajikan pada Gambar 1 berikut.



Uji bakar dengan tungku pijar

Gambar 1. Uji coba pembakaran agregat ringan

Dari uji bakar dengan suhu bervariasi antara 800 °C sampai dengan 1100 °C, berdasarkan pengamatan visual diperoleh hasil:

Waktu pembakaran selama 5 menit:

- a. Pada suhu (800-1000) °C, sampel belum cukup matang dan warna belum merata antara bagian luar dan bagian tengah (inti) agregat, ini menandakan waktu pembakaran belum cukup;
- b. Pada suhu 1100 °C, sampel cukup matang disertai bercak gosong pada bagian luar, tetapi belum merata sampai pada inti agregat, hal ini berarti waktu pembakaran masih perlu ditambah;

Waktu pembakaran selama 10 menit:

- a. Pada suhu 800 °C, sampel belum cukup matang dan warna belum merata antara



Hasil uji bakar dengan berbagai suhu

bagian luar dan bagian tengah (inti) agregat;

- b. Pada suhu (900 - 1000) °C, sampel cukup matang, keras dan warna merata antara bagian luar dan bagian inti agregat;
- c. Pada suhu 1100 °C, sampel terlalu matang, warna hitam/gosong dan material menjadi leleh dan menggumpal/lengket antara butiran agregat satu dengan lainnya.

Uji coba pembakaran tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam produksi agregat ringan dalam skala penuh dengan menggunakan tungku putar dengan menyesuaikan suhu dan waktu bakar yang diinginkan.



Tungku bakar putar (*rotary kiln*)



Pemeriksaan agregat secara visual



Penyimpanan dalam wadah



Uji apung dengan air

Gambar 2. Hasil pembakaran agregat ringan dengan tungku putar dan uji apung

Hasil pengujian agregat ringan

Hasil pengujian agregat ringan hasil pembakaran lumpur Sidoarjo disajikan dalam Tabel 7 dan Tabel 8. Dari Tabel 7, besarnya kadar air dari lumpur Sidoarjo pada suhu bakar 1100 °C sudah mulai konstan yaitu 0,17 %. Berat jenis lumpur hasil pembakaran suhu (800-1100) °C berada dalam batas spesifikasi yang disyaratkan untuk beton struktural yaitu

(1–1,8) gram/cc. Besarnya penyerapan air lumpur Sidoarjo hasil pembakaran pada suhu 1100 °C melebihi batas maksimal yang dipersyaratkan yaitu 26,49 % (syarat mutu untuk beton non-struktural 20 %). Untuk nilai keremukan 10 % lumpur Sidoarjo pada suhu pembakaran (900–1000) °C adalah yang memenuhi persyaratan karena terletak pada nilai keremukan 94,18 %.

Tabel 7. Hasil pengujian agregat ringan (kasar)

No	Uraian uji	Hasil uji pada suhu bakar			Syarat mutu (untuk beton struktural)
		800 °C	(900-1000) °C	1100 °C	
1	Kadar air (%)	0,18	0,17	0,17	
2	Berat jenis (gram/cc)	1,45	1,31	1,23	1,00 -1,80
3	Penyerapan air (%)	18,35	18,63	26,49	Maks. 20
4	Bobot isi:				
	- gembur (kg/L)	0,71	0,66	0,59	-
	- padat (kg/L)	0,75	0,69	0,62	-
5	Nilai keremukan 10% (kN)	80,44	94,18	76,52	88,00 – 137,00

Tabel 8. Hasil pengujian agregat ringan (pasir)

No	Uraian uji	Hasil uji			Syarat mutu (untuk beton struktural)
		Ukuran agregat nominal (mm)			
		2,38-4,76	1,19-2,38	0,15-1,19	
1	Kadar air (%)	0,17	0,16	0,16	-
2	Berat jenis (gram/cc)	1,45	1,53	1,58	1,0 -1,8
3	Penyerapan air (%)	18,93	19,04	21,46	Maks. 20
4	Bobot isi:				
	- gembur (kg/L)	0,66	0,69	0,71	-
	- padat (kg/L)	0,69	0,72	0,74	-
5	Nilai keremukan 10% (kN)	-	-	-	-

Dari Tabel 8, jumlah penyerapan air untuk agregat ringan (pasir) ukuran nominal (0,15-1,19) mm melebihi batas maksimal yang

dipersyaratkan untuk beton non-struktural yaitu sebesar 21,46 % dengan batas maksimal adalah 20 %.

Tabel 9. Proporsi campuran beton ringan

No	Kode	Semen (kg)	Agregat halus/pasir ringan (kg)			Kerikil ringan 4,8-20,0 mm (kg)	Air (kg)	Aditif (L)
			0-1,2 mm	1,2-2,4 mm	2,4-4,8 mm			
1	A ₀	233	74	128	123	226	151	-
2	A ₁	233	74	128	123	226	151	14
3	B	250	80	137	132	183	166	15
4	C	285	91	148	150	140	186	17

Hasil pengujian beton ringan

Untuk mengetahui apakah agregat ringan yang dihasilkan tersebut dapat digunakan untuk pembuatan beton ringan non-struktural, maka dilakukan uji coba pembuatan beton dengan berbagai campuran yang tertuang dalam Tabel 9 dan hasil pengujian beton segar disajikan dalam Tabel 10. Dari Tabel 9 dibuat komposisi campuran A₀ dan A₁ dengan jumlah

sama dalam setiap satu kubik beton, yaitu untuk semen 233 kg, agregat halus diameter (0–1,2) mm sebanyak 74 kg; agregat halus diameter (1,2–2,4) mm sebanyak 128 kg; agregat halus diameter (2,4–4,8) mm sebanyak 123 kg, agregat ringan diameter (4,8–2,0) mm sebanyak 226 kg, air 151 kg. Untuk campuran A₁ ditambah bahan tambah (aditif) sebanyak 14 L.

Tabel 10. Hasil pengujian beton segar

No	Kode Campuran	Hasil uji beton segar			
		Slump (mm)	Berat jenis	Suhu (°C)	Faktor pemadatan (%)
1	A ₀	22	1,238	27	95
1	A ₁	35	1,250	26	96
2	B	50	1,287	26	97
3	C	80	1,296	26	98

Berdasarkan Tabel 10, nilai *slump* pada campuran A₁ sebesar 35 mm dan pada campuran A₀ sebesar 22 mm. Nilai *slump* untuk campuran yang diberi aditif lebih besar dari campuran tanpa penambahan aditif.

Hasil pengujian kuat tekan

Hasil pengujian kuat tekan disajikan dalam Tabel 11, Tabel 12, Tabel 13, dan Tabel 14 berikut.

Tabel 11. Hasil pengujian kuat tekan campuran A₀

No	Kode Campuran	Umur (hari)	Ukuran (mm)		Luas bidang tekan (mm ²)	Berat (kg)	Beban (kg)	Kuat tekan (MPa)	
			H	D				Masing-masing	Rata-rata
1	A ₀	3	200	100	7850	2,04	8,21	10,25	10,05
2			200	100	7850	2,02	7,87	9,82	
3			200	100	7850	2,03	8,06	10,06	
1	A ₀	7	200	100	7850	2,02	10,94	13,65	13,68
2			200	100	7850	2,02	11,15	13,93	
3			200	100	7850	2,01	10,78	13,46	
1	A ₀	28	200	100	7850	2,03	14,10	17,60	17,64
2			200	100	7850	1,97	14,30	17,85	
3			200	100	7850	1,95	14,00	17,48	

Tabel 12. Hasil pengujian kuat tekan campuran A₁

No	Kode Campuran	Umur (hari)	Ukuran (mm)		Luas bidang tekan (mm ²)	Berat (kg)	Beban (kg)	Kuat tekan (MPa)	
			H	D				Masing-masing	Rata-rata
1	A ₁	3	200	100	7850	1,88	8,58	10,71	10,69
2			200	100	7850	1,89	8,60	10,74	
3			200	100	7850	1,92	8,50	10,61	
1	A ₁	7	200	100	7850	1,81	11,20	13,97	14,23
2			200	100	7850	1,89	11,70	14,61	
3			200	100	7850	1,88	11,30	14,11	
1	A ₁	28	200	100	7850	2,03	14,40	17,98	18,02
2			200	100	7850	1,97	14,30	17,86	
3			200	100	7850	1,95	14,60	18,23	

Tabel 13. Hasil pengujian kuat tekan campuran B

No	Kode Campuran	Umur (hari)	Ukuran (mm)		Luas bidang tekan (mm ²)	Berat (kg)	Beban (kg)	Kuat tekan (MPa)	
			H	D				Masing-masing	Rata-rata
1	B	3	200	100	7850	2,11	10,70	13,36	12,60
2			200	100	7850	2,10	9,88	12,33	
3			200	100	7850	2,01	9,70	12,11	
1	B	7	200	100	7850	1,99	12,20	15,23	15,11
2			200	100	7850	2,01	12,00	14,98	
3			200	100	7850	2,01	12,10	15,11	
1	B	28	200	100	7850	2,02	15,50	19,36	19,77
2			200	100	7850	2,03	16,00	19,97	
3			200	100	7850	2,02	16,00	19,97	

Tabel 14. Hasil pengujian kuat tekan campuran C

No	Kode Campuran	Umur (hari)	Ukuran (mm)		Luas bidang tekan (mm ²)	Berat (kg)	Beban (kg)	Kuat tekan (MPa)	
			H	D				Masing-masing	Rata-rata
1	C	3	200	100	7850	2,18	10,88	13,48	13,86
2			200	100	7850	2,16	11,40	14,23	
3			200	100	7850	2,15	11,10	13,86	
1	C	7	200	100	7850	2,15	12,50	15,60	15,40
2			200	100	7850	2,09	12,30	15,36	
3			200	100	7850	2,09	12,10	15,11	
1	C	28	200	100	7850	2,09	16,00	19,97	20,06
2			200	100	7850	2,12	16,20	20,23	
3			200	100	7850	2,08	16,00	19,97	

Hasil pengujian kuat tarik

Pengujian kuat tarik beton ringan dengan agregat ringan lusi menggunakan benda uji berbentuk silinder ukuran tinggi 300 mm dan diameter 150 mm dimaksudkan untuk

mengetahui kuat tarik yang dihasilkan dari berbagai campuran. Hasil pengujian dari berbagai variasi campuran disajikan dalam Tabel 15 berikut.

Tabel 15. Hasil pengujian kuat tarik beton ringan campuran A1, B dan C

No	Kode Campuran	Umur (hari)	Ukuran (mm)		Luas bidang tarik (mm ²)	Berat (kg)	Beban (kg)	Kuat tarik (MPa)	
			H	D				Masing-masing	Rata-rata
1	A ₁	28	300	150	141,3	6,81	13,92	1,93	2,00
2			300	150	141,3	6,98	15,05	2,09	
3			300	150	141,3	6,70	14,20	1,97	
1	B	28	300	150	141,3	6,98	15,44	2,56	2,51
2			300	150	141,3	6,98	18,02	2,50	
3			300	150	141,3	6,97	17,80	2,47	
1	C	28	300	150	141,3	6,90	22,12	3,07	3,18
2			300	150	141,3	6,87	22,96	3,19	
3			300	150	141,3	6,83	23,60	3,27	

Hasil pengujian kuat lentur beton ringan

Pengujian kuat lentur beton ringan dengan agregat ringan lumpur Sidoarjo menggunakan benda uji berbentuk balok ukuran panjang x lebar x tinggi (500x100x100)

mm dimaksudkan untuk mengetahui kuat lentur yang dihasilkan dari berbagai campuran. Hasil pengujian dari berbagai variasi campuran disajikan dalam Tabel 16 berikut.

Tabel 16. Hasil pengujian kuat lentur beton ringan campuran A, B dan C

No	Kode Campuran	Umur (hari)	Ukuran (mm)			Berat (kg)	Beban (kg)	L ₁ (mm)	Kuat lentur (MPa)	
			L ₀	b	h				Masing-masing	Rata-rata
1	A ₁	28	400	100	100	4,89	600	300	2,65	2,79
2			400	100	100	4,76	650	300	2,84	
3			400	100	100	4,76	650	300	2,84	
1	B	28	400	100	100	5,22	720	300	3,18	3,25
2			400	100	100	5,25	740	300	3,26	
3			400	100	100	5,23	750	300	3,31	
1	C	28	400	100	100	5,34	750	300	3,23	3,31
2			400	100	100	5,40	760	300	3,35	
3			400	100	100	5,39	740	300	3,26	

Berdasarkan hasil uji kuat tarik dari ke 3 proporsi campuran di atas terlihat bahwa seluruh campuran dapat mencapai kekuatan di atas 2 MPa dan memenuhi syarat minimum untuk beton non-struktural (BSN 2013), sesuai yang disyaratkan dalam SNI 2847:2013.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian sifat fisik lumpur Sidoarjo pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa hasil pengujian sifat fisik dari bahan lumpur sangat plastis dengan indek plastis 37,40 %, serta nilai *drying shrinkage efficiency* (DSe) dan susut kering yang besar, tetapi

memiliki kekuatan lentur kering yang tinggi (Suripto1995). Hasil tersebut mengindikasikan bahwa dalam proses pengeringan akan terjadi penyusutan yang tinggi, tetapi pada saat pembakaran akan terjadi pengembangan akibat adanya leburan yang viskous cukup untuk menahan gas yang timbul pada temperatur tinggi, serta mengandung zat-zat yang dapat terurai atau bereaksi dengan konstituen lain untuk menghasilkan gas pada temperatur dimana terjadi leburan (Randing 1996).

Tabel 6 menunjukkan bahwa unsur kimia yang terkandung dalam lumpur didominasi oleh unsur silika, alumina dan besi

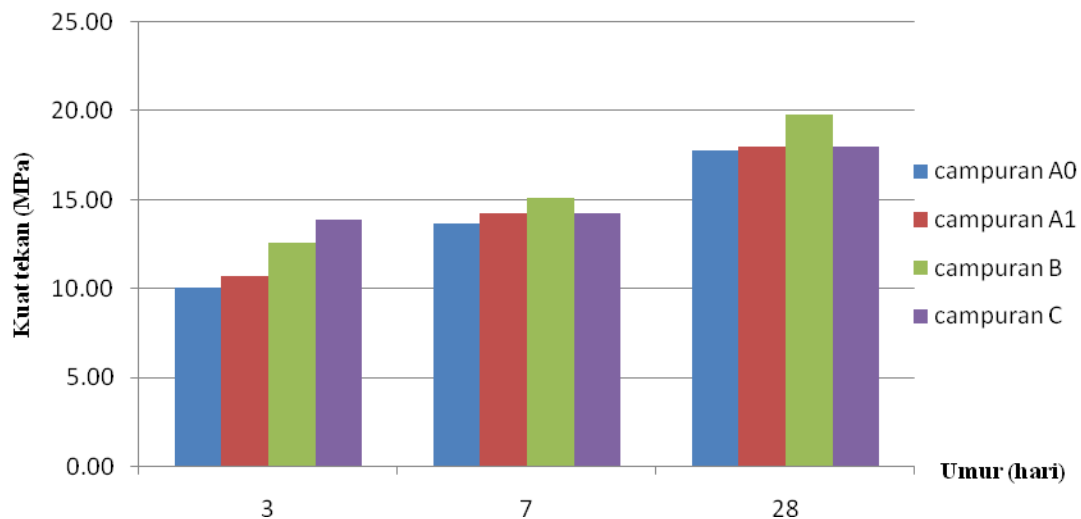
dengan jumlah unsur $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 85,36 %, dengan kandungan unsur tersebut, maka bahan ini sangat baik untuk digunakan sebagai bahan keramik seperti agregat buatan (Randing 1996). Hal penting lainnya adalah bagian hilang pijar sangat kecil yang mengindikasikan bahwa bahan organik sangat rendah termasuk unsur sulfur yang dapat mengganggu pengikatan semen dan keawetan beton atau mortar saat agregat digunakan dalam adukan SNI 2816:2014 (BSN 2014b).

Dari hasil uji pembakaran agregat kasar (kerikil) pada Tabel 7 terlihat bahwa pada suhu bakar 800 °C mutu agregat belum cukup baik karena nilai kekerasannya hanya mencapai 80,44 sehingga belum memenuhi syarat. Pada suhu bakar antara (900–1000) °C menghasilkan mutu agregat yang sangat baik dengan nilai kekerasan 94,18 > 88, sedangkan pada suhu 1100 °C, nilai kekerasan kembali menurun, hal ini menandakan bahwa suhu bakar telah melewati titik sintering sehingga menjadi keropos dan rapuh (Puskim 2014).

Dari hasil pengujian agregat halus (pasir) pada Tabel 8 di atas terlihat bahwa perbedaan ukuran agregat memberikan hasil yang berbeda, semakin halus ukuran agregat

semakin besar berat jenis dan bobot isinya dikarenakan kandungan rongga didalamnya semakin kecil. Sedangkan hasil uji penyerapan air semakin besar karena jumlah butir dalam satuan volume semakin tinggi (BSN 2014).

Dari hasil pengujian beton segar pada Tabel 10 terlihat bahwa penambahan aditif dalam campuran beton memberikan pengaruh terhadap nilai *slump*, tingkat kepadatan dan suhu beton yang dihasilkan (Pujianto 2011). Semakin tinggi kadar aditif menghasilkan nilai *slump* dan faktor pemadatan semakin besar sedangkan suhu beton menjadi semakin rendah. Hal ini disebabkan oleh fungsi aditif sebagai bahan untuk meningkatkan kelecakan beton yang juga berdampak terhadap kemudahan pengerjaan dan pematatannya (Yoshihiko 1995). Sedangkan dari hasil uji kuat tekan dari ke 4 proporsi campuran di atas terlihat bahwa seluruh campuran dapat mencapai kekuatan target mendekati 20 Mpa. Syarat minimum untuk beton non-struktural, sesuai yang disyaratkan dalam SNI 2847:2013 (BSN 2013) adalah kekuatan karakteristik minimal 15 MPa. Perbandingan nilai kuat tekan untuk beton dengan komposisi campuran A_0 , A_1 , B, dan C ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Grafik perbandingan kuat tekan target beton ringan untuk berbagai variasi campuran

Berdasarkan Gambar 3, pada umur 28 hari nilai kuat tekan target rata-rata untuk beton dengan campuran C memberikan hasil

yang lebih tinggi dari campuran A_0 , A_1 , dan B. Peningkatan kuat tekan beton dari campuran C lebih besar 9,69 % dari campuran A_1 dan B.

Untuk hasil uji tarik sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 15, pada umur 28 hari nilai kuat tarik beton untuk campuran A₁, B, dan C berturut-turut sebesar 1,20 MPa, 2,51 MPa, dan 3,18 MPa. Nilai kuat tarik beton dengan campuran C lebih besar 2,60 MPa dari campuran B. Sedangkan untuk uji kuat lentur beton pada umur 28 hari dari campuran A₁, B, dan C, berturut-turut sebesar 2,79 MPa, 3,25 MPa, dan 3,31 MPa. Nilai kuat lentur beton dengan campuran B adalah sama dengan nilai campuran C.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa kandungan kimia dalam lumpur Sidoarjo didominasi oleh silika, alumina, dan besi, ketiganya berjumlah lebih dari 87 %, sehingga cukup baik sebagai bahan baku agregat ringan.

Pembuatan agregat ringan melalui proses pembakaran dengan suhu (900-1000) °C memberikan hasil yang terbaik, hal ini ditunjukkan dengan densitas (6,1–7,0) kg/L dan nilai kekerasan 94,18 kN.

Saran

Dengan kuat tekan target yang dihasilkan mendekati 20 MPa, masih perlu peningkatan mutu beton agar berada di dalam rentang f_c' (15-20) MPa, sehingga dapat memenuhi syarat untuk beton siklop, trotoar, dan pasangan batu. Untuk syarat pelaksanaan, penggunaan margin keamanan 7 MPa dengan kemungkinan cacat 5% masih perlu ditelusuri lebih lanjut.

Perlu dilakukan pengkajian lebih lanjut dengan memodifikasi komposisi kadar bahan dalam campuran beton ringan, agar kepadatan, permeabilitas, dan kuat tekan dapat lebih ditingkatkan, seperti penambahan polimer.

Untuk kreativitas masyarakat setempat, perlu diadakan kajian pemanfaatan lumpur Sidoarjo tanpa proses pembakaran, sebagai bahan-bahan kerajinan dan bata dengan sedikit semen untuk perumahan rakyat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini kami ucapkan terima kasih kepada rekan-rekan peneliti dan teknisi di Laboratorium Bahan dan Struktur Bangunan, Puslitbang Perumahan dan

Permukiman, yang telah membantu sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan. Ucapan terima kasih juga kami sampaikan kepada Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman serta Kepala Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan dan Jembatan yang telah memberi kesempatan dan dukungannya kepada penulis untuk melaksanakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standar Nasional (BSN). 2013. SNI 2847:2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.
- .2014a. *Spesifikasi Agregat Ringan untuk Beton Struktur* SNI 2461:2014. Jakarta: BSN.
- . 2014b. *Metode uji bahan organik dalam agregat halus untuk beton*. SNI 2816:2014. Jakarta: BSN.
- Bardhan, R., Helgesen, and Ikeda. 1995. "Lightweight aggregate concrete in UK". *International Symposium on Structural Lightweight aggregate concrete*. Norway. pp 52-69.
- Dharmagiri, I.B., I Ketut Sudarsana, dan Ni Made Tutarani. 2008. "Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton dengan Penambahan Styrofoam (Styrocon)". *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil* 12(1): 75-85.
- Ekaputri, Januarti Jaya. 2012. "Pemanfaatan lumpur bakar Sidoarjo sebagai bahan campuran pada pembuatan beton ringan dengan menggunakan tambahan buih dan serat alam". *Jurnal Teknik POM ITS* 1(1):1-5.
- Indonesia, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). 2013. *Kajian Teknis Kriteria Ekolabel*. Jakarta: KLHK.
- Indonesia. 2010. *Spesifikasi Umum Jalan dan Jembatan*. Divisi 7. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum.
- Indonesia. 2012. Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa. SNI No. 7656-2012. Jakarta: BSN
- Lasino, M. Edi Nur, dan Dani Cahyadi. 2010. "Penelitian Pemanfaatan Lumpur Sidoarjo Untuk Bata Merah Dan

- Genteng". *Jurnal Permukiman* 5(3): 132-138.
- Liu. J, Bin Shi, Hongtao Jiang, Sunyoung Bae, He Huang. 2009. "Improvement of water-stability of clay aggregates admixed with aqueous polymer soil stabilizers". *Catena* 77(3): 175-179.
- Oesman, M. 2007. *Pemanfaatan Limbah Lumpur Lapindo dalam Campuran Beton*.
(Normal,digilib.polban.ac.id/download.php?id=6719).
- Pujianto. 2011. *Beton mutu tinggi dengan admixture superplastiziser dan additive silica fume*. Jurnal Ilmiah Semesta Teknika 14(2): 177-185.
- Pusat Litbang Permukiman (Puskim). 2009. *Pengembangan Bahan Bangunan Alternatif dari Lumpur Lapindo Dengan Bahan Aditif*. Laporan Internal. Bandung: [s.n.].
- , 2014a. *Pengembangan panel ringan dengan agregat ringan buatan (artificial lightweight aggregate)*. Laporan Internal. Bandung: [s.n.].
- , 2014b. *Artificial Lightweight Aggregate dari Lempung Bekah*. Laporan Internal Bandung: [s.n.].
- Randing. 1996. "Penelitian Tanah Liat dari Lahan Gambut Kalimantan Tengah untuk Bahan Bangunan". *Jurnal Penelitian Permukiman* 12(7): 1-13.
- Sugiarto, A. dan Lasino. 2014. "Pengembangan agregat dari tanah (ARTA) di Merauke-Papua". *Informasi teknologi keramik dan gelas* 35(1).
- Suprianto. 2012. *Tinjauan Kuat Tekan Beton dengan Pemanfaatan Lumpur Kering Tungku ex Lapindo Sebagai Pengganti Semen*. Skripsi. Program Studi Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah.
- Suripto, M. A. 1995. *Teknologi Bahan Bangunan dari Tanah Liat*. Bandung: Balai Besar Industri Keramik.
- Susanto, A. 2012. "Pemanfaatan Lumpur Lapindo sebagai Pengganti Agregat Kasar". *Simposium Nasional RAPI XI FT UMS*.
- Tjokrodinuljo, K. 1996. *Teknologi Beton*. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Yoshihiko Ohama. 1995. *Handbook of Polymer-Modified Concrete And Mortars: Properties and Process Technology*. New Jersey: Noyes Publications.